

The invention relates to a method and a device for processing a workpiece (1) on a smooth, curved surface element (2) having surface normals (3) that each include an angle (5) with a principal vertical line (4) that is smaller than a determined cone (6).

Workpiece (1) is processed using a milling cutter (11, 24) that rotates around an axis of rotation (12), axis of rotation (12) including a determined camber angle (13) with principal vertical line (4), and milling cutter (11, 24) and workpiece (1) being guided only in a translatory manner with respect to each other.



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 196 07 192 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>8</sup>:  
**B 23 C 3/18**

②① Aktenzeichen: 196 07 192.5  
②② Anmeldetag: 26. 2. 96  
④③ Offenlegungstag: 16. 1. 97

DE 196 07 192 A 1

Mit Einverständnis des Anmelders offengelegte Anmeldung gemäß § 31 Abs. 2 Ziffer 1 PatG

⑦① Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

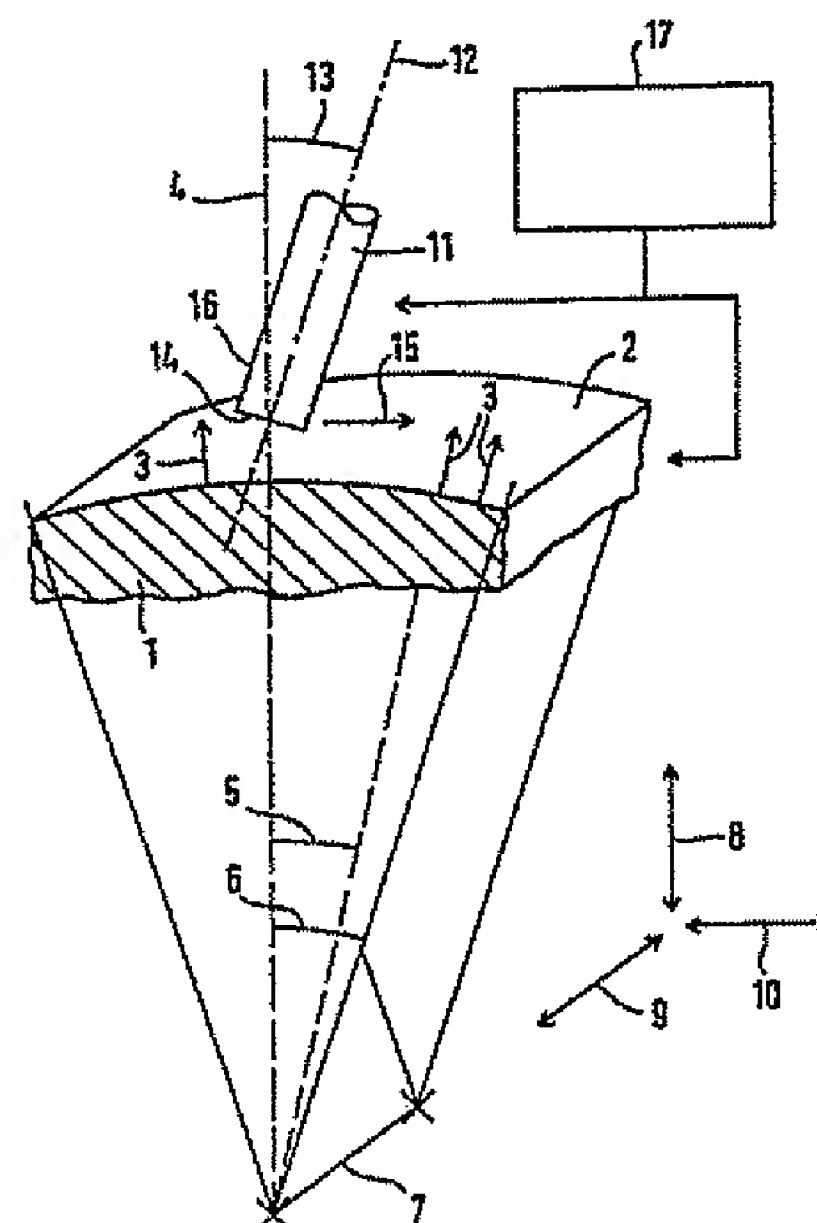
⑦② Erfinder:  
Kranz, Andreas, Dipl.-Ing., 10551 Berlin, DE; Braun,  
Olivier, 14050 Berlin, DE; Mais, Stephan, 13403  
Berlin, DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:  
DE 25 44 812 A1  
WO 95 09 082 A1  
Werbeschrift »Ecomil Kopier-Fräsmaschinen« d. Fa.  
Droop u. Rein, Druckzeichen: Prospekt Nr.  
Kop 8/57/2000;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Fräser

⑤⑦ Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks (1) auf einem glatten, gekrümmten Flächenstück (2), welches Flächennormalen (3) hat, die je mit einer Hauptsenkrechten (4) einen Winkel (5) kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel (6) einschließen. Das Werkstück (1) wird mit einem um eine Rotationsachse (12) rotierenden Fräser (11, 24) bearbeitet, wobei die Rotationsachse (12) mit der Hauptsenkrechten (4) einen bestimmten Sturzwinkel (13) einschließt sowie Fräser (11, 24) und Werkstück (1) nur translatorisch gegeneinander geführt werden.



DE 196 07 192 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks auf einem glatten gekrümmten Flächenstück, welches Flächennormalen aufweist, die jeweils mit einer Hauptsenkrechten einen Winkel einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel ist, wobei das Werkstück mit einem über das Flächenstück geführten, um eine Rotationsachse rotierenden Fräser bearbeitet wird. Die Erfindung betrifft auch eine entsprechende Vorrichtung.

Die Erfindung bezieht sich insbesondere auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks, aus welchem ein aktives Bauteil für eine Strömungsmaschine, insbesondere ein Schaufelblatt für eine Turbomaschine, hergestellt werden soll.

Ein solches Verfahren und eine solche Vorrichtung gehen hervor aus der WO 95/09062 A1 sowie der DE 25 44 612 A1.

Beide genannten Dokumente betreffen Fräsverfahren zur Herstellung eines aktiven Bauteils einer Turbomaschine, insbesondere einer Turboverdichter- oder Turbinenschaufel. Auch sind Bauteile anderer Strömungsmaschinen, beispielsweise Propellerblätter und Schiffsschraubenblätter, herstellbar.

Jedes der in den zitierten Dokumenten beschriebenen Verfahren erfordert es, den benutzten Fräser und das zu bearbeitende Werkstück während der Bearbeitung gegeneinander zu verdrehen. Dieses Erfordernis wird gemäß der WO 95/09062 A1 durchaus vorteilhaft ausgenutzt, um ein im wesentlichen glattes Flächenstück auf dem bearbeiteten Werkstück zu erzielen, jedoch bedeutet dieses Erfordernis, daß im Rahmen der üblichen Praxis eine Fräsmaschine des "fünfsichtigen Typs" verwendet werden muß. Eine "fünfsichtige" Fräsmaschine ermöglicht es, einen Fräser und ein Werkstück vollkommen frei gegeneinander zu bewegen, wofür gegenseitige Verschiebungen oder Translationen entlang dreier zueinander orthogonaler Achsen sowie gegenseitige Drehungen oder Rotationen um zwei zueinander orthogonale Achsen erforderlich sind. Rotationen um zwei Achsen sind ausreichend, da ein Werkzeug immer an einer Fläche eines Werkstücks angreift und relative Positionsveränderungen zwischen dem Fräser und dem Werkstück nur dann von Bedeutung sind, wenn die Fläche verkippt wird. Für ein solches freies Verkippen ist eine Drehbarkeit um nur zwei Achsen, welche beide parallel zu der Fläche liegen, erforderlich.

Es sind auch Werkzeugmaschinen verfügbar, die bei der Bearbeitung lediglich Translationen zwischen einem Fräser und einem Werkstück erlauben und die demgemäß als Werkzeugmaschinen des "dreiachsigen Typs" bezeichnet werden. Zur Erhöhung der Flexibilität erlauben sie unter Umständen eine Verdrehung des Werkstücks gegen den Fräser, aber nur dann, wenn der Fräser nicht an dem Werkstück angreift. Dabei muß der Mechanismus, der die Verdrehung bewirkt, keine hohen Kräfte, wie sie bei der Bearbeitung entstehen, aufnehmen und kann dementsprechend einfach gestaltet sein. Da lediglich drei Antriebe erforderlich sind, die stark genug sind, um die bei der Bearbeitung entstehenden Kräfte aufzunehmen und die gewünschten Translationen zwischen dem Fräser und dem Werkstück bewirken, ist eine dreiaxige Werkzeugmaschine wesentlich weniger aufwendig als eine fünfsichtige Werkzeugmaschine und dementsprechend billiger.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks auf einem

glatten gekrümmten Flächenstück anzugeben, welches auf einer Werkzeugmaschine des dreiachsigen Typs realisierbar ist.

Um ein aktives Bauteil einer Strömungsmaschine herstellen zu können, muß es möglich sein, ein in gewissen Grenzen gekrümmtes Flächenstück bearbeiten zu können. An das Flächenstück ist durchaus eine gewisse einschränkende Bedingung stellbar, nämlich eine Bedingung, daß die Krümmung in gewisser Weise beschränkt bleibt. Vorliegend lautet die Bedingung dahingehend, daß das Flächenstück Flächennormalen haben soll, die mit einer dem Flächenstück zugehörigen Hauptachse einen Winkel einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel ist. Alle Flächennormalen sollen also innerhalb eines Kegels liegen, welcher Kegel einen Öffnungswinkel hat, der dem Doppelten Kegelwinkel entspricht, und der die Hauptachse als Bezugsachse hat.

Neben dem Verfahren soll auch eine entsprechende, also insbesondere auf einer dreiachsigen Werkzeugmaschine realisierbare, Vorrichtung angegeben werden.

Zur Lösung der Aufgabe im Hinblick auf ein Verfahren angegeben wird ein Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks auf einem glatten gekrümmten Flächenstück, welches Flächennormalen aufweist, die jeweils mit einer Hauptachse einen Winkel einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel ist, wobei das Werkstück mit einem über das Flächenstück geführten, um eine Rotationsachse rotierenden Fräser bearbeitet wird, wobei die Rotationsachse mit der Hauptachse einen bestimmten und während der Zerspanung im wesentlichen konstant bleibenden Sturzwinkel einschließt sowie der Fräser und das Werkstück nur translatorisch gegeneinander bewegt werden.

Das Verfahren geht aus von der überraschenden Erkenntnis, daß es zum Fräsen eines Flächenstücks nicht erforderlich ist, einen vorgegebenen Sturzwinkel zwischen dem Fräser und einer Flächennormalen des Flächenstücks an der Stelle, an der der Fräser an dem Werkstück angreift, während der gesamten Bearbeitung konstant zu halten. Tatsächlich kann eine gewisse Schwankung dieses Sturzwinkels, welcher bezüglich der Hauptachse des Flächenstücks lediglich einmal fest eingestellt wird, toleriert werden, und dies hat sogar den Vorzug, daß der Fräser sich weniger abnutzt. Schneidkanten des Fräasers greifen nämlich nicht immer in ein und derselben Weise an dem Flächenstück an, sondern mit dem schwankenden Sturz verändert sich auch die Belastung der Schneidkanten, und dies sowohl in der Richtung als auch in dem Ort, der auf der Schneidkante jeweils am höchsten beansprucht ist. Somit verteilt sich die Beanspruchung und die daraus resultierende Materialermüdung wesentlich gleichmäßiger über den Fräser als dies bisher der Fall war, und dadurch kann die Lebensdauer des Fräasers verlängert werden.

Vorzugsweise ist das Werkstück derart orientiert, daß die Hauptsenkrechte etwa senkrecht zu einer Vorschubachse ausgerichtet ist, wobei der Fräser entlang von entlang der Vorschubachse hintereinanderliegenden Bahnen, deren jede etwa in einer zu der Vorschubachse senkrechten Ebene liegt, über das Werkstück geführt wird und der Fräser von dem Werkstück entfernt wird, um von einer zu einer anderen Bahn postiert zu werden.

Auf diese Weise erfolgt die Bearbeitung des Werkstücks entlang von Bahnen, die entlang der Vorschubachse hintereinander angeordnet sind. Ist der Fräser von dem Werkstück entfernt, so kann das Werkstück gegebenenfalls um die Vorschubachse verdreht werden.

Diese Weiterbildung erlaubt es, ein Werkstück zu bearbeiten, das in sich verwunden ist, wie es bei einem Schaufelblatt für eine Turbine oder einen Turboverdichter oft der Fall ist. Somit ist es nicht mehr erforderlich, eine für das gesamte Werkstück maßgebliche Haupt senkrechte festzulegen; vielmehr kann für jede Bahn oder für jede Anordnung mit jeweils mehreren Bahnen gesondert eine Hauptsenkrechte festgelegt und vor der Bearbeitung des Flächenstückes in eine entsprechende Position gedreht werden. Diese Weiterbildung des Verfahrens erfordert lediglich eine in geringem Umfang ertüchtigte Werkzeugmaschine des dreiachsigen Typs, denn während der eigentlichen Bearbeitung ist weiterhin nur eine translatorische Bewegung des Fräasers gegen das Werkstück erforderlich. Das deutliche mehr an Flexibilität wird somit mit einem nur geringen Mehraufwand an der Werkzeugmaschine erkaufte.

Eine bevorzugte Weiterbildung des Verfahrens, bei dem der Fräser über entlang der Vorschubachse hintereinander liegenden Bahnen geführt wird, ist dadurch ausgezeichnet, daß der Fräser abwechselnd in einer zu der Vorschubachse senkrechten Vorzugsrichtung und entgegen dieser Vorzugsrichtung über die Bahnen geführt wird. Dabei ist die Vorzugsrichtung üblicherweise derart definiert, daß der Fräser bestimmungsgemäß arbeitet, wenn er in der Vorzugsrichtung über das Werkzeug geführt wird. Wird der Fräser entgegen der Vorzugsrichtung über das Werkstück geführt, so bearbeitet er das Werkstück mit einer Hinterkante, die hierfür eigentlich nicht vorgesehen ist. Es hat sich allerdings herausgestellt, daß in Verbindung mit dem erfindungsgemäßen Fräsverfahren keine dem Fräser unzutragliche Belastung auftritt; das beschriebene Wandern der am meisten belasteten Zone über den Fräser wirkt in diesem Zusammenhang sowohl mildernd als auch ausgleichend. In diesem Zusammenhang ist es von besonderem Vorteil, wenn die Bearbeitung einer Bahn, über die der Fräser entgegen der Vorzugsrichtung geführt werden muß, erst dann erfolgt, wenn jede dieser Bahn unmittelbar benachbarte und in Vorzugsrichtung zu bearbeitende Bahn bearbeitet ist. Damit ist nämlich auch die entgegen der Vorzugsrichtung zu bearbeitende Bahn bereits teilweise bearbeitet, und es sind lediglich kleinere Grate verblieben, die noch entfernt werden müssen. Dies erfolgt nun problemlos, indem die Bahn entgegen der Vorzugsrichtung bearbeitet wird.

Bei einer ebenfalls bevorzugten Weiterbildung des Verfahrens, wobei der Fräser in Vorzugsrichtung und entgegen der Vorzugsrichtung über die Bahnen auf dem zu bearbeitenden Flächenstück geführt wird, wird das Werkstück in zwei Arbeitsschritten mit einem über jeweilige Bahnen geführten jeweiligen Fräser bearbeitet, wobei der entsprechende Fräser in einem ersten Arbeitsschritt nur in einer Vorzugsrichtung über die entsprechenden Bahnen geführt wird und wobei der entsprechende Fräser in einem zweiten Arbeitsschritt sowohl in einer Vorzugsrichtung als auch dieser entgegen über die entsprechenden Bahnen geführt wird. Der erste Arbeitsschritt erfolgt insbesondere vor dem zweiten Arbeitsschritt, wobei das Werkstück in dem ersten Arbeitsschritt geschruppt und in dem zweiten Arbeitsschritt geschlichtet wird. Dann wird der entsprechende Fräser in dem ersten Arbeitsschritt, in dem in relativ großem Umfang Werkstoff zu zerspanen ist, nur in einer Vorzugsrichtung über die entsprechenden Bahnen geführt und dementsprechend nur in bestimmungsgemäßer Weise beansprucht. In dem zweiten Arbeitsschritt, der hauptsächlich der Glättung der im ersten Arbeits-

schritt erzeugten Oberfläche dient und bei dem relativ wenig Werkstoff abzutragen ist, kann der entsprechende Fräser dann sowohl in der zugehörigen Vorzugsrichtung als auch dieser entgegen über die entsprechenden Bahnen geführt werden, wobei die Belastung des Fräasers beim Führen entgegen der Vorzugsrichtung in vorstehend beschriebener Weise weiter reduziert werden kann.

Der in dem Verfahren jedweder Ausgestaltung verwendete Fräser kann ein Stirnfräser sein, also ein zylindrischer Fräser, der das Werkstück hauptsächlich mit einer flachen oder leicht gewölbten Stirnfläche bearbeitet. In diesem Fall beträgt der Kegelwinkel am Werkstück bis  $20^\circ$  und ist kleiner als der Sturzwinkel, damit der Fräser in jedem Fall einen gewissen Sturz relativ zu dem Flächenstück beibehält. Der Sturzwinkel ist vorzugsweise zumindest  $1^\circ$  größer als der Kegelwinkel.

Alternativ kann als Fräser auch ein Kugelfräser verwendet werden, also ein zumindest halbkugelig geformter Fräser. In diesem Fall kann der Sturzwinkel gleich Null gewählt werden, und der Kegelwinkel kann deutlich größer sein, als es für einen Stirnfräser möglich wäre. Insbesondere ist der Kegelwinkel größer als  $30^\circ$ . Es ist sogar denkbar, den Kegelwinkel etwa gleich  $90^\circ$  zu machen. Dies bedeutet, daß sogar ein halbzyklisches Flächenstück bearbeitet werden kann.

Das zu bearbeitende Werkstück ist insbesondere ein aktives Bauteil für eine Strömungsmaschine, insbesondere ein Schaufelblatt für eine Turbomaschine. Das Flächenstück ist dabei beispielsweise eine konkav gewölbte Druckseite oder eine konvex gewölbte Saugseite des Schaufelblatts. Kanten an dem Schaufelblatt, die die Saugseite mit der Druckseite verbinden, werden unter Umständen anderweitig bearbeitet, gegebenenfalls ist auch deren Bearbeitung im Rahmen des vorstehend beschriebenen Verfahrens möglich.

Zur Lösung der Aufgabe im Hinblick auf eine Vorrichtung angegeben wird eine Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks auf einem glatten gekrümmten Flächenstück, welches Flächennormalen aufweist, die jeweils mit einer Hauptsenkrechten einen Winkel einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel ist, umfassend einen um eine Rotationsachse drehbaren Fräser sowie eine Steuereinrichtung zur Führung des Fräasers gegen das Werkstück, wobei die Steuereinrichtung programmiert ist zur Postierung des Fräasers derart, daß die Rotationsachse mit der Haupt senkrechten einen bestimmten Sturzwinkel einschließt, sowie daß der Fräser und das Werkstück nur translatorisch gegeneinander geführt werden.

Wesentliche Vorteile der Vorrichtung sowie ihrer Weiterbildungen erschließen sich aus der Erläuterung des erfindungsgemäßen Verfahrens und seiner Weiterbildungen, auf die hiermit verwiesen wird.

Ein wesentlicher Vorteil ist, daß die Vorrichtung als Werkzeugmaschine des dreiachsigen Typs vorgesehen werden kann und damit gegenüber den bisher in der Regel erforderlichen fünfachsigen Werkzeugmaschinen einen wesentlichen Kostenvorteil bietet. Dieser Kostenvorteil betrifft nicht nur die Anschaffungskosten und Programmierungskosten der Werkzeugmaschine selbst, sondern auch die auf der Werkzeugmaschine ablaufende Bearbeitung; diese Bearbeitung erfolgt nämlich mit einer wesentlich einfacheren Steuerung als eine Bearbeitung auf einer fünfachsigen Werkzeugmaschine und kann dementsprechend erheblich schneller sein als jene.

Die Steuereinrichtung zur Führung des Fräasers gegen das Werkstück kann eine speicherprogrammierbare

Steuerung unter Einbeziehung eines Mikroprozessors sein, wie sie üblicherweise in Werkzeugmaschinen der in Rede stehenden Art eingesetzt wird. Auch kann die Steuereinrichtung ein entsprechend an die Werkzeugmaschine angekoppelter Universalrechner sein. Auch ist es selbstverständlich möglich, die Steuereinrichtung aus diskreten Bauteilen in Form einer elektronischen oder elektromechanischen Einheit zu bilden. Ein wichtiges Merkmal der Steuereinrichtung ist ein speziell konzipiertes Programm zur Steuerung der Vorrichtung, welches, in welcher Realisierung auch immer, die Vorrichtung so steuern kann, daß das Verfahren wie vorher beschrieben ausführbar ist. Entsprechende Ausgestaltungen der Vorrichtung ergeben sich somit anhand der vorstehend beschriebenen Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Eine bevorzugte Weiterbildung der Vorrichtung zeichnet sich aus durch einen Drehantrieb zur gegenseitigen Verdrehung des Werkstücks und des Fräasers um die Vorschubachse, wenn der Fräser von dem Werkstück entfernt ist, und eine zur entsprechenden Steuerung des Drehantriebs programmierte Steuereinrichtung.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nunmehr anhand der Zeichnung erläutert. Zur Herausstellung bestimmter Merkmale ist die Zeichnung teilweise schematisiert und/oder leicht verzerrt ausgeführt. Es wird nicht geltend gemacht, daß die Zeichnung eine maßstäbliche Wiedergabe eines Ausführungsbeispiels sei. Hinweise zur Ergänzung der aus der Zeichnung direkt erkennbaren Lehren ergeben sich aus dem einschlägigen Stand der Technik, insbesondere den zitierten Dokumenten. In den Figuren tragen einander entsprechende Teile und Merkmale jeweils dasselbe Bezugszeichen. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel unter Benutzung eines Stirnfräasers;

Fig. 2 eine Turbinenschaufel, hergestellt gemäß den vorstehenden Ausführungen; und

Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel unter Benutzung eines Kugelfräasers.

Fig. 4 und 5 Ausführungsbeispiele unter Benutzung je eines Stirnfräasers.

Fig. 1 demonstriert ein Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks 1 auf einem glatten gekrümmten Flächenstück 2, welches Flächennormalen 3 aufweist, die jeweils mit einer Hauptsenkrechten 4 einen Winkel 5 einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel 6 ist. Im vorliegenden beispielhaften Fall bildet das Flächenstück 2 einen Ausschnitt aus einer Fläche eines Zylindermantels, wobei der Ausschnitt so begrenzt ist, daß er bezüglich einer Mittellinie 7 des Zylindermantels innerhalb des Kegelwinkels 6 liegt. Hieraus ergibt sich, daß die Krümmung des Flächenstücks 2, beziehungsweise die Abweichung des Flächenstücks 2 von einer Ebene, einer bestimmten Beschränkung unterliegt, wie sie vorstehend definiert wurde. Eine solche Beschränkung ist selbstverständlich nicht nur für einen Ausschnitt aus einem Zylindermantel realisierbar, sondern für viele Flächenstücke 2, die in der technischen Praxis auftreten. Entsprechende Einschränkungen gelten z. B. in der Regel für die Saugseiten und Druckseiten von Schaufeln für Turbomaschinen; siehe hierzu die Ausführungen zu Fig. 2.

Das in Fig. 1 dargestellte Flächenstück 2 soll nun durch Fräsen aus dem Werkstück 1 herausgearbeitet werden. Um dies im Rahmen eines üblichen, programmgesteuerten Fräsprozesses tun zu können, beispielsweise

se im Rahmen eines CNC-Fräsprozesses, muß für das Flächenstück 2 eine der maschinellen Bearbeitung angepaßte Beschreibung erarbeitet werden. Wie diese Beschreibung im einzelnen aussieht, ist Sache des jeweiligen Einzelfalls; auszugehen ist jedenfalls immer von einem dem Werkstück 1 und dem aus diesem herauszuarbeitenden Flächenstück 2 besonders angepaßten Koordinatensystem 8, 9, 10. Mit Bezug auf dieses Koordinatensystem 8, 9, 10 sind dann insbesondere die Bearbeitungsvorgänge festzulegen, die für die Herausarbeitung des Flächenstücks 2 erforderlich sind. Das Koordinatensystem 8, 9, 10 beinhaltet vorzugsweise eine erste Achse 8, welche parallel zu der Hauptsenkrechten 4 des Flächenstücks 2 gewählt wird.

Das Werkstück 1 wird bearbeitet mittels eines Stirnfräasers 11, welcher um eine zugehörige Rotationsachse 12 rotiert. Die Rotationsachse 12 bildet mit der Hauptsenkrechten 4 einen bestimmten und während der Bearbeitung im wesentlichen konstant bleibenden Sturzwinkel 13, der im vorliegenden Fall verschieden von Null ist und einen Wert von etwa 20°, insbesondere 17,5°, annehmen kann. Der Stirnfräser 11 bearbeitet das Werkstück 1 hauptsächlich mit einer Stirnseite 14, welche im wesentlichen senkrecht zur Rotationsachse 12 ausgerichtet ist. Wenn er über das Werkstück 1 geführt wird, so muß diese Stirnfläche 14 mit einem von Null verschiedenen Winkel gegen diejenige Fläche auf dem Flächenstück 2, an der er angreift, gekippt sein. Dementsprechend ist der Sturzwinkel 13 etwas größer, insbesondere 1° größer, als der Kegelwinkel 6. Außerdem gibt es eine Vorzugsrichtung 15, entlang derer der Stirnfräser 11 über das Flächenstück 2 geführt wird; diese liegt in einer von der Hauptsenkrechten 4 und der Rotationsachse 12 aufgespannten Ebene und ist im wesentlichen senkrecht zur Hauptsenkrechten 4 gerichtet. Eine Bewegung des Stirnfräasers 11 in der Vorzugsrichtung 15 stellt sicher, daß das Werkstück 1 hauptsächlich von der zylindrischen Fläche 16, die mehr oder weniger einem Zylindermantel entspricht, gegebenenfalls mit einem abgerundeten Übergang zur Stirnfläche 14, angegriffen wird. Üblicherweise hat ein Stirnfräser 11 nicht nur auf der zylindrischen Fläche 16 Schneidkanten (der Übersicht halber nicht dargestellt), sondern die Schneidkanten ziehen sich auch zumindest über einen Teil seiner Rotationsachse 12 etwa senkrechten Stirnfläche 14. Daher ist es grundsätzlich auch möglich, den Stirnfräser 11 anders, insbesondere entgegen der Vorzugsrichtung 15, über das Flächenstück 2 zu führen. Solches resultiert üblicherweise in einer geringeren Schnittleistung, kann aber, wie noch auszuführen sein wird, von Vorteil sein.

Zum Koordinatensystem 8, 9, 10 sei bemerkt, daß dieses neben einer zur Hauptsenkrechten 4 parallelen ersten Achse 8 eine zweite Achse oder Vorschubachse 9 und eine dritte Achse 10 aufweist, wobei die dritte Achse 10 mit der ersten Achse 8 eine Ebene aufspannt, die parallel zur von der Hauptsenkrechten 4 und der Rotationsachse 12 parallelen Ebene ist, und wobei die zweite Achse 9 senkrecht zu diesen Ebenen ausgerichtet ist. Die Bearbeitung des Werkstücks 1 erfolgt, indem der Stirnfräser 11 zum Bearbeiten derart über das Flächenstück 2 geführt wird, daß er in einer zur ersten Achse 8 und zur dritten Achse 10 parallelen Ebene verbleibt; anschließend wird er von dem Flächenstück 2 abgehoben und entlang der Vorschubachse 9 versetzt, um dann erneut in Kontakt mit dem Werkstück 1 gebracht und wie soeben beschrieben bewegt zu werden. Anhand der Fig. 2 wird dies noch näher erläutert.

Die Bearbeitung des Werkstücks 1 erfordert, wie

auch soeben erklärt, Relativbewegungen zwischen dem Stirnfräser 11 und dem Werkstück 1. Um diese Relativbewegungen ausführen zu können, ist eine Steuereinrichtung 17 vorgesehen, welche für die Positionierung des Stirnfräasers 11 und des Werkstücks 1 sowie deren Bewegungen relativ zu einander sorgt. Dies erfolgt durch ein in der Steuereinrichtung 17 vorhandenes Programm.

Maßgebliche Merkmale eines solchen Programms sind bereits erläutert worden; hierauf wird zur Vermeidung von Wiederholungen Bezug genommen.

Fig. 2 zeigt ein Werkstück 1 in Form einer Schaufel für eine Turbomaschine. Gemäß üblicher Praxis hat die Schaufel 1 ein Fußteil 18, ein Kopfteil 19 und ein Blatteil 20, welches das funktionell aktive Teil ist. Das Blatteil 20 hat eine konvex gekrümmte Saugseite und eine konkav gekrümmte Druckseite; im vorliegenden Beispiel ist die Saugseite sichtbar. Für die vorliegende Erläuterung kommt es vor allem auf das Herstellen des Blatteils 20 im Sinne der vorstehenden Erläuterungen an. Das Blatteil 20 wird gefräst, indem ein Fräser, insbesondere ein Stirnfräser 11 wie erläutert anhand der Fig. 1, über Bahnen 21 geführt wird, die entlang einer zur Vorschubachse 9, welche gleichzeitig eine Längsachse der Schaufel 1 ist, parallelen Hauptrichtung 22 hintereinanderliegen. Jede Bahn 21 liegt etwa in einer zur Vorschubachse 9 senkrechten Ebene. Um den Bearbeitungsprozeß möglichst schnell durchzuführen, wird der zur Bearbeitung eingesetzte Fräser sowohl in Vorzugsrichtung 15 als auch entgegen der Vorzugsrichtung 15 über die Bahnen 21 geführt. Dabei wechseln sich Bahnen 21, über die der Fräser in Vorzugsrichtung 15 geführt werden muß, ab mit Bahnen 21, über die der Fräser entgegen der Vorzugsrichtung 15 geführt werden muß. Um die Belastung des Fräasers so gering wie möglich zu halten für den Fall, daß er entgegen der Vorzugsrichtung 15 über das Blatteil 20 geführt wird, wird eine entgegen der Vorzugsrichtung 15 zu bearbeitende Bahn 21 erst dann bearbeitet, wenn beide unmittelbar benachbarten Bahnen 21, die jeweils in Vorzugsrichtung 15 bearbeitet werden müssen, bearbeitet sind. Um dies zu bewerkstelligen, ist eine besonders angepaßte Abfolge zur Bearbeitung der einzelnen Bahnen 21 vorgesehen. Der Fräser wird nämlich um eine Bahn 21 entgegen der Hauptrichtung 22 versetzt, nachdem er in Vorzugsrichtung 15 über eine Bahn 21 geführt wurde, und er wird um drei Bahnen 21 in Hauptrichtung 22 versetzt, nachdem er entgegen der Vorzugsrichtung 15 über eine Bahn geführt wurde. Dies ist mit entsprechenden Pfeilen in der Fig. 2 dargestellt. Diese Abfolge kommt mit einem besonders geringen Aufwand für die entsprechende Postierung des Fräasers relativ zum Werkstück 1 aus. Die Abfolge wird vorzugsweise realisiert in einem zweiten Arbeitsschritt von zwei Arbeitsschritten, wobei das Werkstück 1 in einem ersten Arbeitsschritt geschruppt, also lediglich unter Annäherung an das herzustellende Flächenstück 2 unter relativ hohem Abtrag von Werkstoff bearbeitet wird, wobei eine Relativbewegung des Fräasers gegen das Werkstück 1 nur in Vorzugsrichtung 15 erfolgt, und wobei in einem zweiten Arbeitsschritt das Werkstück 1 geschlichtet wird, was bedeutet, daß das gewünschte Flächenstück 2 mit der gewünschten und möglichen Präzision bei relativ geringem Materialabtrag aus dem Werkstück 1 herausgearbeitet wird; da der Abtrag von Material gering ist, kann der Fräser in diesem Fall auch problemlos entgegen der Vorzugsrichtung 15 bewegt werden.

Generell erfolgt die Bearbeitung des Werkstücks 1

derart, daß ausschließlich translatorische Bewegungen des Fräasers gegen das Werkstück 1 vorgenommen werden; ein Verdrehen erfolgt allenfalls dann, wenn die Bearbeitung des Werkstücks 1 aussetzt, beispielsweise um den Fräser von einer auf eine andere Bahn 21 zu postieren. Im in Fig. 2 dargestellten Ausführungsbeispiel kann ein solches Verdrehen erforderlich sein, da das Blatteil 20 um die Vorschubachse 9 verwunden ist. Dadurch ist es unter Umständen nicht möglich, eine Hauptsenkrechte 4 für das gesamte Blatteil 20 anzugeben; in diesem Fall behilft man sich derart, daß man verschiedene, gegeneinander verdrehte Haupt senkrechten 4 für entsprechende Teilbereiche des Blatteils 20 vorsieht und das Blatteil 20 entsprechend dreht, wenn ein solcher Teilbereich bearbeitet werden soll. Unter Umständen ist jeder einzelnen Bahn 21 eine besondere Hauptsenkrechte 4 zugeordnet. Um das Werkstück 1 entsprechend drehen zu können, ist ein Drehantrieb 23 vorgesehen. Dieser muß nicht so leistungsstark und belastbar sein, daß er alle Kräfte, die sich beim Bearbeiten auf das Werkstück 1 einstellen könnten, aufnehmen könnte; hierfür kann eine zusätzliche Klemmeinrichtung vorgesehen sein. Der Drehantrieb 23 muß auch nicht unbedingt eine kontinuierliche Drehung ermöglichen, er kann einzelne Rastpunkte haben. Der apparative Mehraufwand bleibt dementsprechend vorteilhaft begrenzt.

Fig. 3 zeigt auf, wie im Rahmen des vorstehend beschriebenen Verfahrens ein Kugelfräser 24 Einsatz finden kann. Ein Kugelfräser 24 weist eine kugelig gestaltete Schneidfläche 25 auf, die entsprechend mit Schneidkanten versehen ist und mit der das Werkstück 1 bearbeitet wird. Bei einem Kugelfräser 24 kann der Sturzwinkel Null sein, d. h. die Rotationsachse 12 mit der Mittelsenkrechten 4 zusammenfallen. Viele der vorstehend für den Stirnfräser 11 erläuterten Einschränkungen gelten für den Kugelfräser 24 nicht gleichermaßen. Der Kugelfräser 24 erlaubt für das Werkstück 1 bedeutend größere Kegelwinkel als der Stirnfräser 11; für den Stirnfräser 11 liegt der Kegelwinkel 6 bei höchstens 40°, insbesondere bei etwa 35°. Mit einem Kugelfräser 24 ist hingegen die Bearbeitung eines Werkstücks 1 noch möglich, das einen Kegelwinkel 6 bis 90°, womöglich sogar mehr, aufweist. Gleichwohl erscheint es nicht angezeigt, den Kugelfräser 24 als Universalwerkzeug zu betrachten, mit dem jedwede fertigungstechnische Aufgabe gelöst werden könnte. Die Auswahl zwischen Stirnfräser 11 und Kugelfräser 24 bleibe daher, ebenso wie die Auswahl weiterer maßgeblicher Parameter und Randbedingungen des Fertigungsprozesses, dem Ermessen des einschlägig tätigen Fachmanns überlassen.

Die Fig. 4 und 5 zeigen Ausführungsbeispiele, bei denen jeweils ein Stirnfräser 11 zum Einsatz kommt. Der in Fig. 4 gezeigte Stirnfräser 11 wird benutzt zum Schruppen des Werkstücks 1, der in Fig. 5 gezeigte Fräser 11 dient zum Schlichten des Werkstücks 1. Nachfolgend wird auf beide erwähnten Figuren gemeinsam Bezug genommen; auf wesentliche Unterschiede der Ausführungsbeispiele wird jeweils separat hingewiesen. Jeder Stirnfräser 11 ist bezüglich der Rotationsachse 12 rotationssymmetrisch, nämlich im wesentlichen zylindrisch, aufgebaut und hat eine etwa zylindrische Außenfläche 16 sowie eine etwa senkrecht zur Rotationsachse 12 orientierte Stirnfläche 14. An den Übergängen zwischen der jeweiligen Stirnfläche 14 und der jeweiligen Mantelfläche 16 sind besondere Messer 26 angebracht, mit denen jeweils das Fräsen erfolgt. Die Messer 26 sind vorzugsweise auswechselbar, so daß der Träger des jeweiligen Stirnfräasers 11 deutlich länger als jeweils ein

einzelnes Messer 26 verwendet werden kann.

Bei jedem Stirnfräser 11 ist der Übergang zwischen der Stirnfläche 14 und der zylindrischen Fläche 16 deutlich gerundet, und dies bei dem zum Schlichten bestimmten Stirnfräser 11 gemäß Fig. 5 deutlich mehr als bei dem zum Schrappen bestimmten Stirnfräser 11 gemäß Fig. 4. In beiden Figuren ist auch die Vorzugsrichtung 15 eingetragen, in der der Stirnfräser 11 während des Fräsens vorzugsweise über das Werkstück 1 bewegt wird. Man erkennt, daß bei einer Bewegung des Stirnfräasers 11 in Vorzugsrichtung 15 die zylindrische Fläche 16 den zu bearbeitenden Teilen des Werkstücks 1 zugewandt ist; die Stirnfläche 14 weist dabei von den zu bearbeitenden Bereichen weg, bzw. sie liegt im Hinblick auf die zur Bearbeitung vorzunehmende Bewegung des Stirnfräasers 11 hinter denjenigen Teilen des Stirnfräasers 11, mit denen die Bearbeitung des Werkstücks 1 unmittelbar erfolgt.

Das erfindungsgemäße Fräsverfahren ist hervorragend geeignet zur Bearbeitung von Werkstücken wie Turbinenschaufeln, wobei es an die zu seiner Ausübung erforderlichen Maschinen vergleichsweise geringe Anforderungen stellt. Insbesondere ermöglicht es die Verwendung einer Fräsmaschine des dreiachsigen Typs. Das Verfahren zeichnet sich auch aus durch eine vergleichsweise geringe Beanspruchung des verwendeten Fräswerkzeugs.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bearbeitung eines Werkstücks (1) auf einem glatten gekrümmten Flächenstück (2), welches Flächennormalen (3) aufweist, die jeweils mit einer Hauptsenkrechten (4) einen Winkel (5) einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel (6) ist, wobei das Werkstück (1) mit einem über das Flächenstück (2) geführten, um eine Rotationsachse (12) rotierenden Fräser (11, 24) bearbeitet wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Rotationsachse (12) mit der Hauptsenkrechten (4) einen bestimmten und während der Bearbeitung im wesentlichen konstant bleibenden Sturzwinkel (13) einschließt und der Fräser (11, 24) und das Werkstück (1) nur translatorisch gegeneinander geführt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Werkstück (1) derart orientiert ist, daß die Hauptsenkrechte (4) etwa senkrecht zu einer Vorschubachse (9) ausgerichtet ist, bei dem der Fräser (11, 24) entlang von entlang der Vorschubachse (9) hintereinander liegenden Bahnen (21), deren jede etwa in einer zu der Vorschubachse (9) senkrechten Ebene liegt, über das Flächenstück (2) geführt wird und bei dem der Fräser (11, 24) von dem Werkstück (1) entfernt wird, um von einer zu einer anderen Bahn (21) postiert zu werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem das Werkstück (1) um die Vorschubachse (9) verdreht wird, wenn der Fräser (11, 24) von dem Werkstück (1) entfernt ist.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, bei dem der Fräser (11, 24) abwechselnd in einer zu der Vorschubachse (9) senkrechten Vorzugsrichtung (15) und entgegen der Vorzugsrichtung (15) über die Bahnen (21) geführt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem der Fräser (11, 24), bevor er über eine entgegen der Vorzugsrichtung (15) zu bearbeitende Bahn (21) geführt

wird, über jede dieser Bahn (21) unmittelbar benachbarte und in der Vorzugsrichtung (15) zu bearbeitende Bahn (21) geführt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem eine Hauptrichtung (22) parallel zur Vorschubachse (9) definiert ist, entlang derer die Bahnen (21) hintereinander liegen, bei dem der Fräser (11, 24) um eine Bahn (21) entgegen der Hauptrichtung (22) versetzt wird, nachdem er in Vorzugsrichtung (9) über eine Bahn (21) geführt wurde, und bei dem der Fräser (11, 24) um drei Bahnen (21) in Hauptrichtung (22) versetzt wird, nachdem er entgegen der Vorzugsrichtung (15) über eine Bahn (21) geführt wurde.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, bei dem das Werkstück (1) in zwei Arbeitsschritten mit einem über jeweilige Bahnen (21) geführten jeweiligen Fräser (11, 24) bearbeitet wird, wobei der entsprechende Fräser (11, 24) in einem ersten Arbeitsschritt nur in einer Vorzugsrichtung (15) über die entsprechenden Bahnen (21) geführt wird, und wobei der entsprechende Fräser (11, 24) in einem zweiten Arbeitsschritt sowohl in einer Vorzugsrichtung (15) als auch dieser entgegen über die entsprechenden Bahnen (21) geführt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem der erste Arbeitsschritt vor dem zweiten Arbeitsschritt erfolgt, wobei das Werkstück (1) in dem ersten Arbeitsschritt geschruppt und in dem zweiten Arbeitsschritt geschlichtet wird.

9. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, bei dem als Fräser (11, 24) ein Stirnfräser (11) verwendet wird, und bei dem der Kegelwinkel (6) bis  $20^\circ$  beträgt und kleiner als der Sturzwinkel (13) ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem der Sturzwinkel (13) zumindest  $1^\circ$  größer als der Kegelwinkel (6) ist.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem als Fräser (11, 24) ein Kugelfräser (24) verwendet wird, und bei dem der Sturzwinkel (13) etwa  $0^\circ$  beträgt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem der Kegelwinkel (6) größer als  $30^\circ$ , insbesondere etwa gleich  $90^\circ$ , ist.

13. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, bei dem das Werkstück (1) zur Herstellung eines aktiven Bauteils (1) für eine Strömungsmaschine, insbesondere einer Schaufel (1) für eine Turbomaschine, bearbeitet wird.

14. Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks (1) auf einem glatten gekrümmten Flächenstück (2), welches Flächennormalen (3) aufweist, die jeweils mit einer Hauptsenkrechten (4) einen Winkel (5) einschließen, der kleiner als ein bestimmter Kegelwinkel (6) ist, umfassend einen um eine Rotationsachse (12) drehbaren Fräser (11, 24) sowie eine Steuereinrichtung (17) zur Führung des Fräasers (11, 24) gegen das Werkstück (1), dadurch gekennzeichnet, daß die Steuereinrichtung (17) programmiert ist zur Postierung des Fräasers (11, 24) gegen das Werkstück (1) derart, daß die Rotationsachse (12) mit der Hauptsenkrechten (4) einen bestimmten Sturzwinkel (13) einschließt sowie der Fräser (11, 24) und das Werkstück (1) nur translatorisch gegeneinander geführt werden.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, deren Steuereinrichtung (17) programmiert ist zur Führung des Fräasers (11, 24) über Bahnen (21), welche entlang einer zur Hauptsenkrechten (4) senkrechten Vor-

schubachse (9) hintereinanderliegen und deren jede etwa in einer zur Vorschubachse (9) senkrechten Ebene liegt.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, die einen Drehantrieb (23) zur Verdrehung des Werkstücks (1) gegen den Fräser (11, 24) um die Vorschubachse (9), wenn der Fräser (11, 24) von dem Werkstück (1) entfernt ist, aufweist und deren Steuereinrichtung (17) programmiert ist zur entsprechenden Steuerung des Drehantriebs (23).

17. Vorrichtung nach Anspruch 15 oder 16, deren Steuereinrichtung (17) programmiert ist zur Führung des Fräasers (11, 24) über die Bahnen (21) abwechselnd in einer zur Vorschubachse (9) senkrechten Vorzugsrichtung (15) und entgegen der Vorzugsrichtung (15).

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, deren Steuereinrichtung (17) programmiert ist derart, daß der Fräser (11, 24) erst entgegen der Vorzugsrichtung (15) über eine Bahn (21) geführt wird, nachdem er in der Vorzugsrichtung (15) über jede unmittelbar benachbarte Bahn (21) geführt wurde.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, deren Steuereinrichtung (17) derart programmiert ist, daß der Fräser (11, 24) um eine Bahn (21) entgegen einer zur Vorschubachse (9) parallelen Hauptrichtung (22) versetzt wird, nachdem er in Vorzugsrichtung (15) über eine Bahn (21) geführt wurde, und daß der Fräser (11, 24) um drei Bahnen (21) in Hauptrichtung (22) versetzt wird, nachdem er entgegen der Vorzugsrichtung (15) über eine Bahn (21) geführt wurde.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

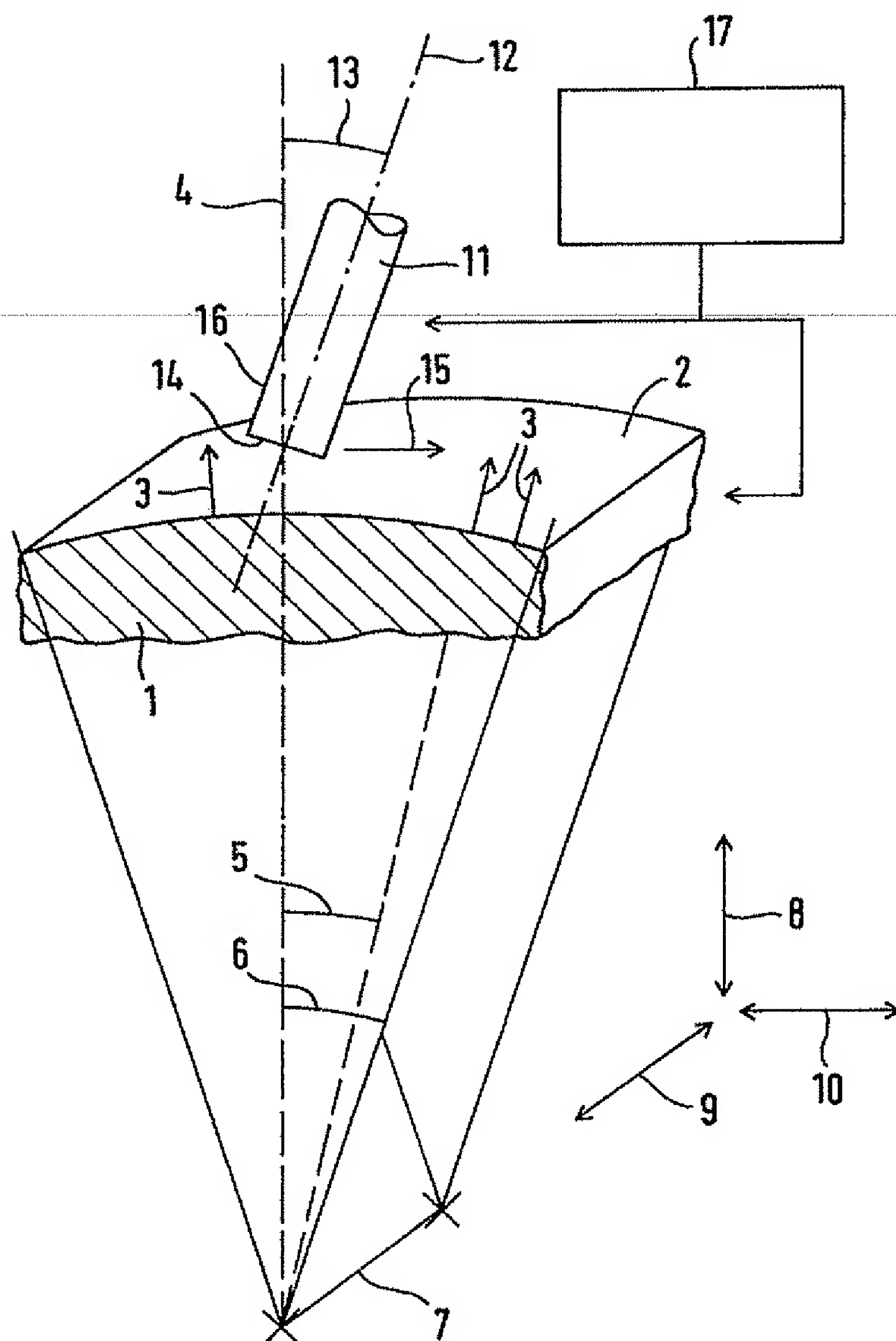
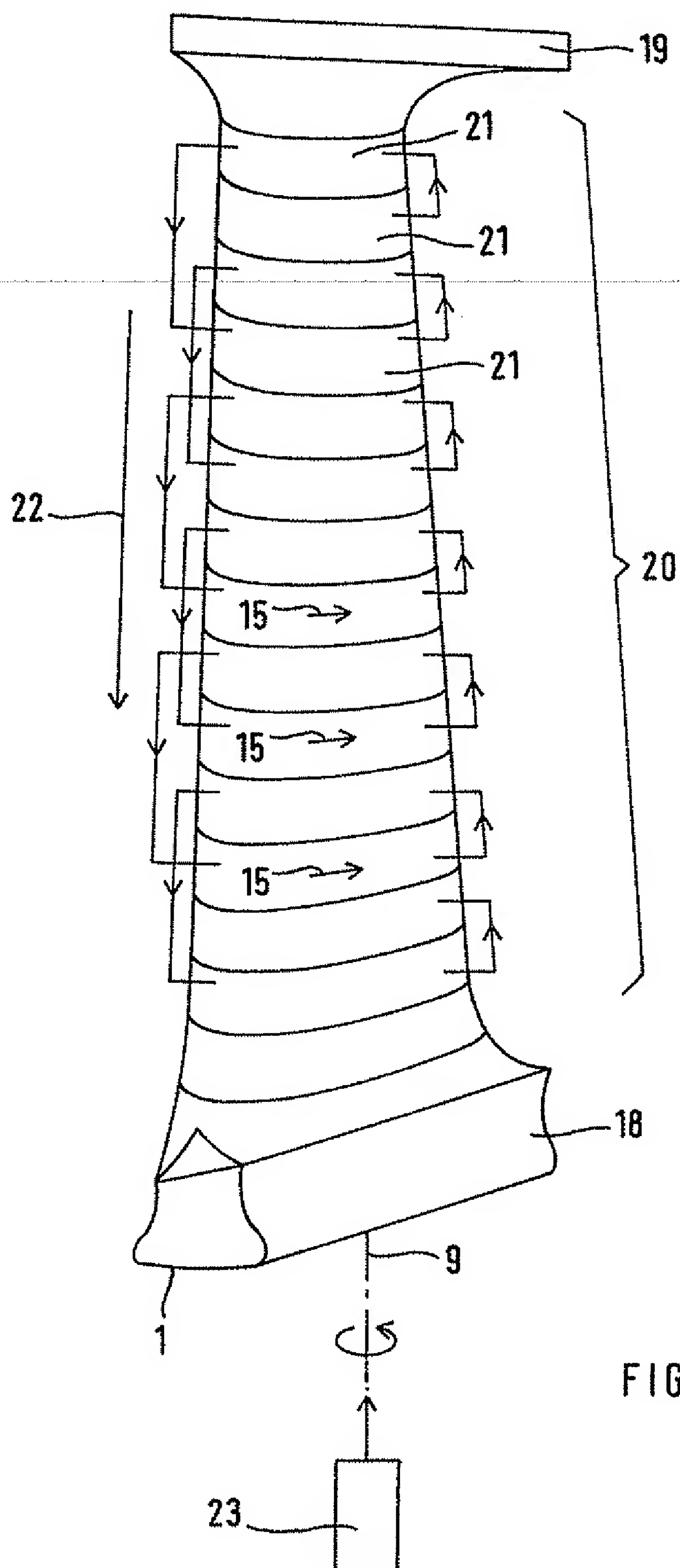
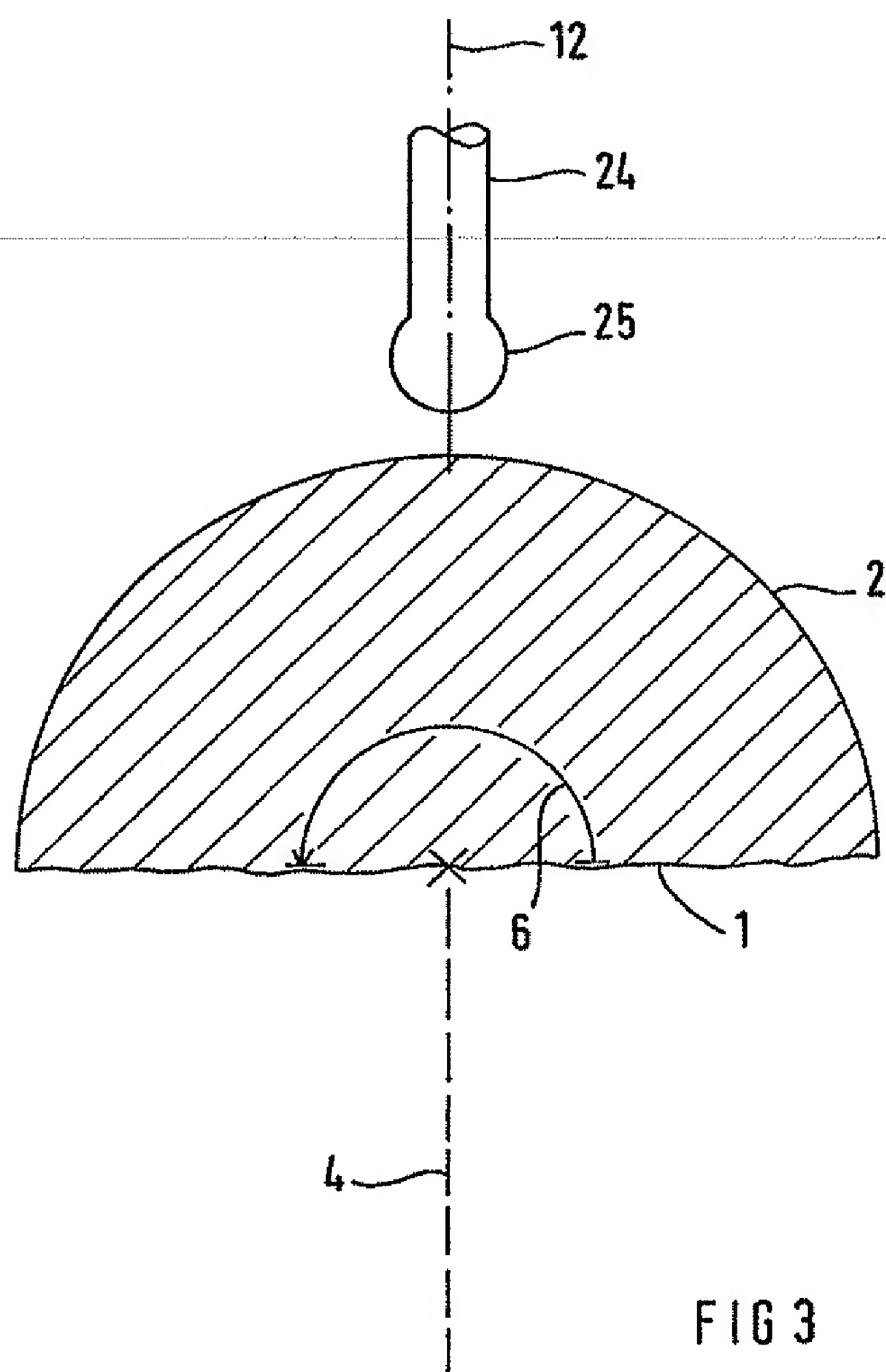


FIG 1





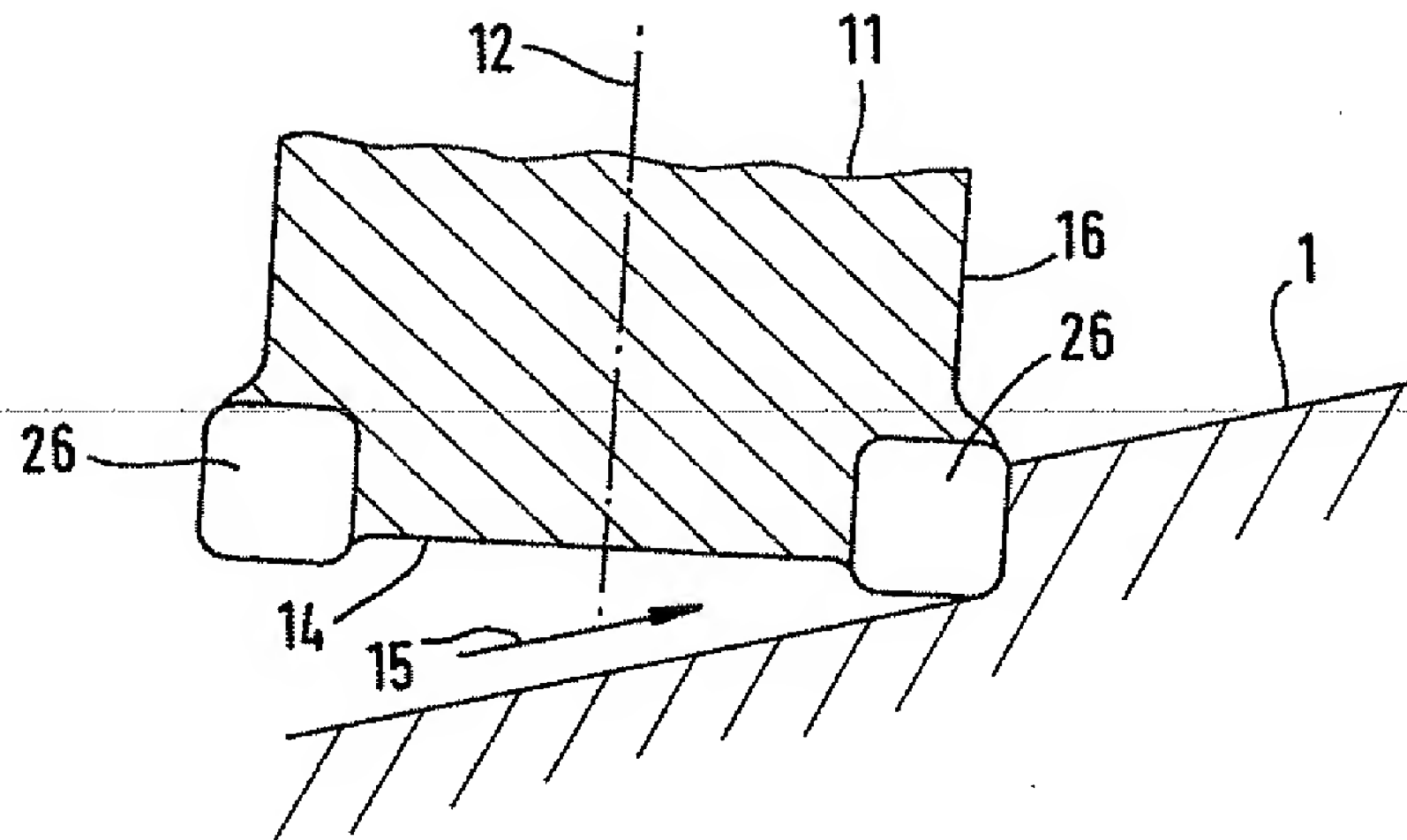


FIG 4

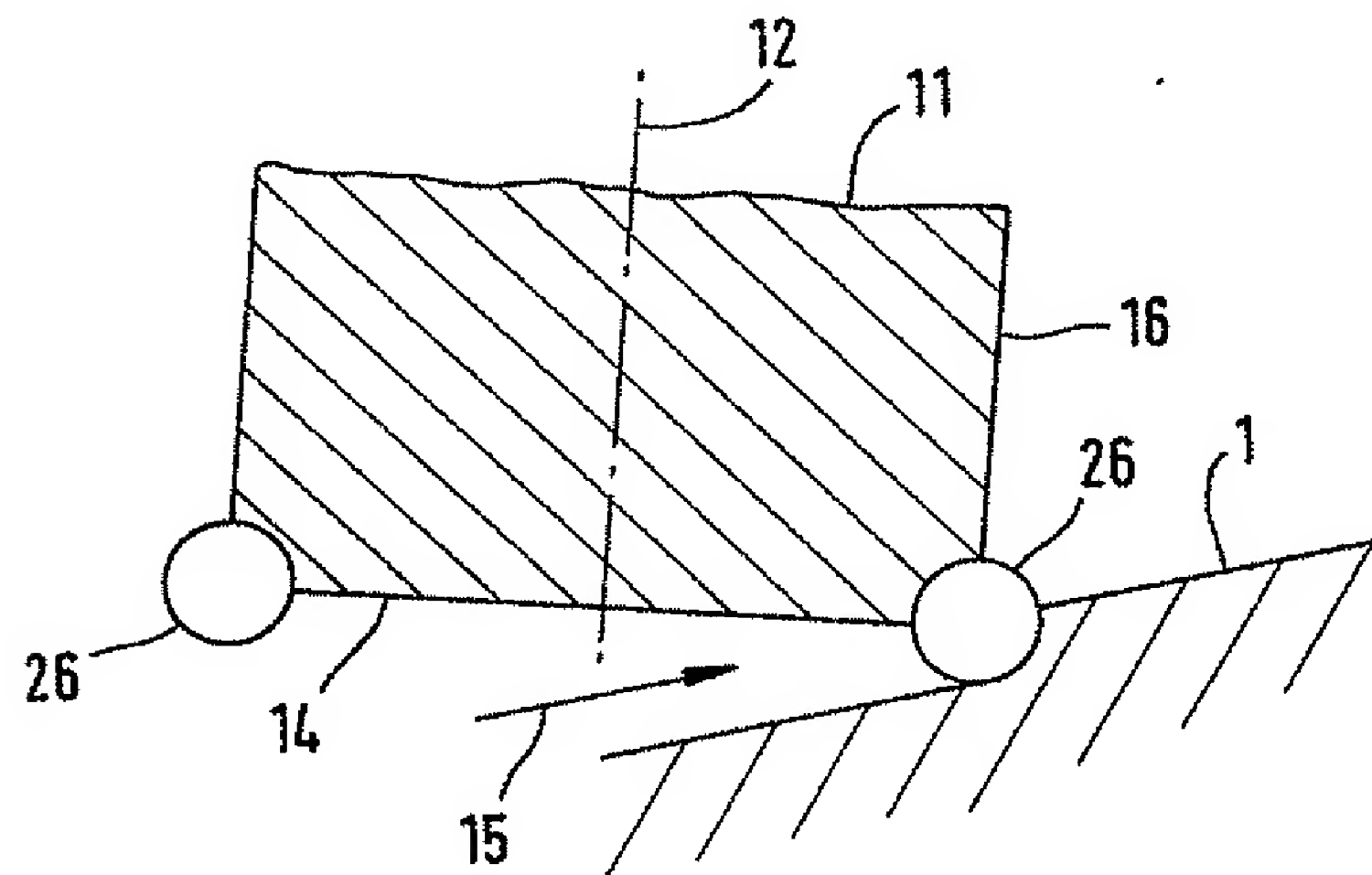


FIG 5